

М. О. Кувшинов^{*}, А. А. Хлыбов

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

^{*}*makskuvshinov2007@yandex.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *А. А. Хлыбов*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (ППД)

В статье приведен сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования (статических и динамических). Показаны преимущества и недостатки методов ППД и их влияние на эксплуатационные свойства деталей и машин.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, наклеп, ультразвуковая ударная обработка, механические свойства, шероховатость.

М. О. Kuvshinov, A. A. Khlybov

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

The article presents a comparative analysis of methods of surface plastic deformation (static and dynamics). The advantages and disadvantages of surface plastic deformation methods and their effect on the operational properties of parts and machines are shown.

Keywords: surface plastic deformation, cold work, ultrasonic shock treatment, mechanical properties, roughness.

В целях повышения геометрических и физико-механических характеристик поверхностного слоя, который оказывает первостепенное влияние на эксплуатационные свойства изделий, проводят отделочно-упрочняющую обработку детали.

В качестве отделочно-упрочняющей обработки широко применяются методы поверхностно-пластического деформирования. Это обусловлено их невысокой стоимостью, низкой трудоёмкостью и отсутствием стружки. Все методы ППД основаны на использовании пластических свойств металлов, способных принимать остаточные напряжения без нарушения целостности и объёма заготовки. В отличие от абразивных методов отделочной обработки при пластическом деформировании помимо улучшения геометрических свойств наблюдается также существенное упрочнение поверхности, что немаловажно для повышения долговечности

работы машин и механизмов. После ППД детали становятся более устойчивыми к усталостному разрушению, у них повышается коррозионная стойкость и износостойкость сопряжений, удаляются риски и микротрещины, оставшиеся после обработки резанием. Методы ППД могут быть применены для всех металлов, способных пластически деформироваться [2, 3].

По характеру контакта инструмента и заготовки различается *статическое* и *динамическое* ППД.

Статические методы ППД характеризуются стабильностью формы и размеров очага деформации благодаря стационарному контакту инструмента и заготовки [1, 4].

В качестве инструментального материала, используемого при статическом ППД, применяются износостойкие шарикоподшипниковые стали ШХ15, ШХ15СГ и ШХ20СГ; легированные стали 18ХГТ, 20Х2Н4ВА, 11Х18М, 95Х18 и 8Х4В9Ф2; природный и синтетический алмазы.

Накатывание позволяет снизить силы трения между инструментом и заготовкой и добиться высокой производительности процесса. В качестве инструмента используются шарики или ролики, твёрдость которых должна превышать твёрдость обрабатываемого материала. Ролики обеспечивают большую производительность. Обкатывание происходит в условиях трения качения с проскальзыванием. Благодаря самоустанавливаемости шара обеспечивается свободное вращение при трении качения между ним и обрабатываемой поверхностью. В производственной практике применяются схемы обката с жёстким и упругим контактом инструмента и заготовки.

Обкатывание шаром применяется в случаях необходимости создания глубокого упрочнённого слоя, обработки жёстких деталей, повышения производительности при использовании крупных заготовок и обработки материалов, исключаящих выглаживание алмазом ввиду сильной адгезии (титановые сплавы и др.).

В целом, накатывание обладает лучшей производительностью и позволяет добиться большей глубины, но меньшей степени упрочнения, чем алмазное выглаживание. Показатели качества поверхности составляют после обкатывания $R_a = 0,05...1$ мкм, $\sigma'_{ост} = -100...400$ МПа; после раскатывания $R_a = 0,05...0,32$ мкм, $\sigma'_{ост} = -150...400$ МПа [1, 4, 5].

Алмазное выглаживание характеризуется малой производительностью и невысокой стойкостью дорогостоящего инструмента. Поскольку алмаз является анизотропным материалом, для получения требуемой прочности и твёрдости при установке в оправку необходимо добиться правильной кристаллографической ориентации его положения. Алмазное выглаживание рекомендуется использовать при повышенных требованиях к шероховатости и твёрдости получаемой

поверхности, а также при обработке маложёстких деталей. Ввиду высокой твёрдости алмаза выглаживание используется для отделочно-упрочняющей обработки закалённых сталей. Поскольку алмаз практически не деформируется, а его радиус крайне мал, площадь контакта инструмента с деталью оказывается незначительной. Это обуславливает создание высоких контактных давлений даже при небольших нормальных силах, необходимых для совершения деформации.

Недостатком технологии алмазного выглаживания является невозможность обработки титановых сплавов ввиду повышенной адгезионной составляющей указанного коэффициента вследствие налипания частиц металла на деформирующий инструмент [4].

В целом, алмазное выглаживание позволяет добиться меньшей шероховатости и большей микротвёрдости обработанных поверхностей, нежели накатывание, при снижении глубины наклёпа. Необходимо отметить, что в тех случаях, когда требуется получить чистую поверхность с большой глубиной и степенью упрочнения, следует применять последовательную обработку – сначала обкатывание, а затем выглаживание. Для сокращения числа повторных ходов нужно стремиться подобрать оптимальное давление, позволяющее обработать требуемую поверхность за один рабочий проход. При этом следует иметь в виду, что путём повторных рабочих ходов может быть повышена лишь степень упрочнения, но не её глубина. Показатели качества поверхности после выглаживания составляют $R_a = 0,05...1$ мкм, $\sigma'_{ост} = -100...1400$ МПа [1, 4, 5].

Дорнование является высокопроизводительным процессом, сочетающим возможности отделочной, упрочняющей, калибрующей и формообразующей обработок. Его применяют для обработки отверстий, когда необходимо получить высокие геометрические и физико-механические характеристики поверхности. Сущность дорнования сводится к перемещению инструмента с натягом внутри не закреплённой заготовки, при этом размеры инструмента несколько превосходят диаметр отверстия. Показатели качества поверхности после дорнования составляют $R_a = 0,1...1,6$ мкм, $\sigma'_{ост} = -100...500$ МПа [1, 4, 5].

Динамические методы ППД характеризуются прерывистым импульсным внедрением индентора в заготовку. Многочисленные удары, наносимые инструментом по поверхности металла, оставляют на нём большое число локальных пластических деформаций (лунок), которые постепенно покрывают всю обрабатываемую площадь. Очаг деформации образуется в результате периодического внедрения индентора в поверхность материала и зависит от энергии удара и степени перекрытия отпечатков. При этом рисунок поверхности, как правило, состоит из сетки частично либо полностью перекрывающих друг друга лунок [1].

В качестве материала для инструмента при динамическом ППД используются различные инструментальные стали: углеродистые У10 и

У10А; быстрорежущие Р18, Р6АМ5, Р6М5К5, Р9М4К8 и Р9К5; твердосплавные ВК6, ВК8 и ВК10 (при динамическом нагружении с изнашиванием в порядке повышения устойчивости к ударным нагрузкам), а также ВК15, ВК20 и ВК25 (при динамическом нагружении без изнашивания в порядке повышения устойчивости к ударным нагрузкам) [12].

Вибронакатывание и вибровыглаживание применяется в случаях необходимости выдавливания на поверхности заготовки едва заметных канавок для удержания смазки и продуктов износа в процессе эксплуатации. Оно осуществляется шаром или алмазом, которым дополнительно сообщаются колебания. Изменяя амплитуду и частоту, можно получить требуемый рисунок из сетки лунок. Показатели качества поверхности после вибронакатывания составляют $R_a = 0,06 \dots 1,6$ мкм, $\sigma'_{ост} = -100 \dots 450$ МПа [1, 4, 5].

Чеканка поверхности механическим или пневматическим молотком, форма рабочей части которого соответствует профилю упрочняемой заготовки, позволяет добиться значительных сжимающих напряжений и максимальной глубины наклёпанного слоя, достигающей значения несколько десятков миллиметров. Однако шероховатость после обработки заметно ухудшается, ввиду чего следующей операцией обычно является шлифование. Показатели качества поверхности после чеканки составляют $R_a = 8 \dots 32$ мкм, $\sigma'_{ост} = -200 \dots 1000$ МПа [1, 4, 5].

Дробеструйная обработка осуществляется благодаря использованию кинетической энергии металлических шариков, которые летят в потоке воздушной струи и с высокой скоростью ударяются о поверхность заготовки, упрочняя её. Шероховатость при этом значительно ухудшается. Данный метод обычно используется для упрочнения упругих элементов подвески транспортных средств - пружин, рессор и торсионов, а также для зубчатых шестерен, шатунов, лопаток винтов и других деталей машин, имеющих сложный профиль [1, 4, 5].

Ультразвуковая обработка (УЗО) является относительно новым методом ППД. Деформирование поверхностного слоя производится акустической головкой, колеблющейся с ультразвуковой частотой, в которую впаян твёрдосплавный индентор. Благодаря воздействию ультразвуковых колебаний значительно снижается сопротивление металла пластической деформации. Некоторые учёные выдвигают гипотезу облегчения перемещения дислокаций внутри зёрен по плоскостям скольжения под воздействием высокочастотных колебаний, другие исследователи объясняют это явление снижением предела текучести, третьи связывают данный факт с повышением мгновенной температуры в очаге деформации и улучшением пластичности металла. Однако, поскольку время нагрева очага деформации ввиду высокой скорости и дискретности внедрения крайне мало, при УЗО не происходит релаксации остаточных напряжений и полиморфных превращений.

На первом этапе осуществляется статический прижим инструмента к заготовке с силой 50...300 Н, которая выбирается исходя из физико-механических характеристик обрабатываемой поверхности и условия исчерпания упругой деформации металла в зоне контакта, позволяя направить энергию удара на пластическую деформацию. На втором этапе включается ультразвуковой генератор и к статическому усилию добавляется динамическая сила величиной 500...2500 Н, которая обеспечивает внедрение индентора на глубину, сопоставимую с высотой исходной шероховатости профиля, приводя к пластической деформации поверхностного слоя детали.

Технология УЗО позволяет обрабатывать внешние и внутренние цилиндрические поверхности, а также плоскости – кольца, ролики и вкладыши подшипников, коренные шейки коленчатого и распределительного валов, гильзы цилиндров, тормозные диски и барабаны, направляющие качения и скольжения металлорежущих станков, валы прокатных станов, сварные швы и др.

За счёт большого количества входных факторов - частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний, формы и радиуса индентора, силы статического прижима, скорости главного движения и величины подачи, а также недостаточной изученности их корреляции и влияния на качество получаемой поверхности технология ультразвуковой обработки является перспективным направлением научных исследований, обладая высоким потенциалом и резервами изучения. Показатели качества поверхности после УЗО составляют $R_a = 0,05...1$ мкм, $\sigma'_{ост} = 100...850$ МПа [1, 4, 5].

Технология упрочнения УЗО может эффективно использоваться для устранения напряженного состояния сварных соединений различных видов на изделиях из конструкционных сталей и коррозионной защиты этих соединений.

Анализируя технологические возможности различных методов ППД, можно прийти к выводу, что они покрывают большую часть всей существующей номенклатуры деталей машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. Москва : Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. Москва : Машиностроение, 1988. 240 с.
3. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. Москва : Машиностроение, 2000. 320 с.

4. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. Москва : Машиностроение, 1978. 152 с.
5. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. Москва : Машиностроение, 1987. 328 с.